

М.А. Гнусов, А.А. Платонов, Д.Ю. Дручинин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЁМА  
ВОРОХА ВОЛОЧЕНИЯ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ,  
ФОРМИРУЕМОГО ЛЕСНЫМИ ГРАБЛЯМИ**

*Введение.* Технологическая операция сбора (сгребания) порубочных остатков неотъемлемой частью входит в состав целого ряда технологических процессов выполнения работ по заготовке древесины или целенаправленного удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности. Текущий сценарий систем лесоводства во всем мире очень часто не предполагает наличия специальной техники, в результате чего технологическая операция сбора (сгребания) порубочных остатков нередко выполняются вручную [Morais et al., 2023]. Не рассматривая в данном исследовании ручной способ сбора порубочных остатков (широко, впрочем, распространённый на территории России) отметим, что указанная операция должна выполняться специализированными техническими средствами под общим названием «лесные грабли» [Платонов, 2023]. Однако, несмотря на важность и возможность [Трушевский и др., 2024] выполнения указанной технологической операции, сами лесные грабли рассматриваются в современных отечественных и мировых научно-исследовательских работах весьма поверхностно, зачастую лишь в рамках обсуждения вопросов о необходимости сбора (фактически – заготовки) формирующейся биомассы из порубочных остатков.

Выполненным нами обзором современных научных работ было установлено отсутствие исследований, в которых проводилась бы частная или комплексная оценка критериев совершенствования технических средств сбора или сгребания порубочных остатков (лесных грабель). Некоторые современные исследования сосредоточены на оценке взаимосвязи между сгребанием порубочных остатков и экологическими последствиями такого процесса [Dickens et al., 2020; Elliot, Rhee, 2022], целый ряд исследований посвящён обсуждению выгод, которые лесозаготовители получают от формирующихся рынков биомассы [Garren et al., 2022; Fokin et al., 2024; Louis et al., 2024; Kühmaier, Grünberg, 2025], а также возможности использования «зелёных отходов» как источника энергии [Маганов и др., 2024; Kunickaya et al., 2024; Mcgookin et al., 2025]. Ряд научных работ посвящён

выявлению взаимосвязи между затратами на сгребание порубочных остатков и производительностью такого процесса [Louis et al., 2022; Yoshimura et al., 2025], в том числе по различным придорожным территориям [Рябухин и др., 2023; Fernandez-Lacruz et al., 2020; Nilsson, Grönlund, 2024]. Лишь некоторые исследователи [Laitila, Väättäinen, 2020, 2021] выделяют необходимость определения объёма собираемой (сгребаемой) биомассы, при этом наш обзор выявил отсутствие исследований, оценивающих такой ключевой момент достижения оптимальной производительности лесных граблей, как определение (в том числе моделирование) объёма формируемого ими вороха порубочных остатков.

Целью исследования является разработка математической модели формирования объёма вороха порубочных остатков с целью повышения эффективности их сгребания лесными граблями.

Цель работы достигается посредством разработки соответствующего математического описания, принимающего во внимание конструктивные параметры технических средств сгребания порубочных остатков (лесных граблей), а также параметры порубочных остатков с учётом допустимых факторов формирования лесными граблями вороха волочения порубочных остатков.

*Материалы и методика исследования.* Исследование, являющееся теоретическим, базируется на анализе и моделировании физических особенностей перемещения древесной биомассы по очищаемой от неё поверхности, а также по поверхности лесных граблей.

Объект исследования представлял собой лесные грабли с ломаным профилем зубьев постоянного сечения поверхности и наличием предохранительных устройств, закрепляющиеся на переднюю (преимущественно) или заднюю навеску трактора типа Belarus-82.1. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что подобные лесные грабли (с числом зубьев  $Z = 5$ ) являются наиболее характерными техническими средствами сгребания порубочных остатков для современного российского и белорусского производства (рис. 1).

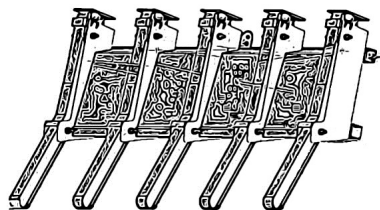


Рис. 1. Модель лесных граблей  
Fig. 1. Forest rake model

Предметом исследования является математическая модель формирования посредством лесных граблей объёма вороха порубочных остатков с учётом параметров лесных граблей и сгребаемой биомассы.

Для достижения поставленной цели использовались методы математического моделирования, а именно: кинематический (для учёта траектории движения зубьев лесных граблей, углов обвала свежесрезанных порубочных остатков), динамический (для учёта устойчивости лесных граблей и вороха порубочных остатков).

*Результаты исследования.* В процессе сгребания лесными граблями 1 свежесрезанных порубочных остатков перед рассматриваемыми техническими средствами формируется ворох волочения 2, состоящий, как правило, из смеси элементов древесной массы (веток, стеблей, листьев или хвои и т. д.) и, в незначительном количестве (зависит от модели лесных граблей), срезанного зубьями лесных граблей грунта (рис. 2).

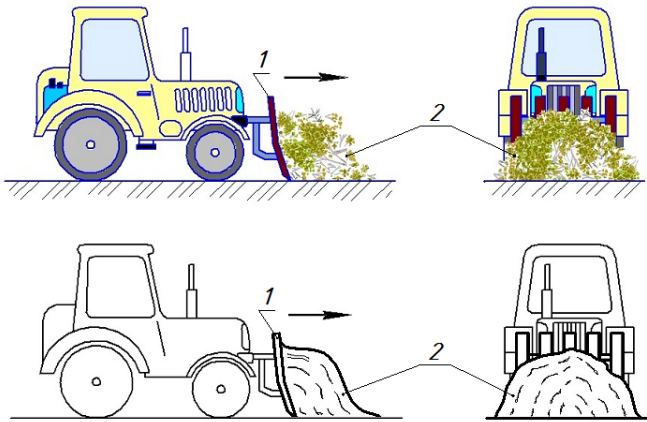


Рис. 2. Ворох волочения, формируемый перед лесными граблями  
Fig. 2. A pile of drag material formed in front of a forest rake

Ворох волочения порубочных остатков, каждый раз формируемый лесными граблями в процессе их прохождения по очищаемой территории, определяется сочетанием конструктивных и технологических параметров работы, обладая такими отличительными характеристиками, как масса, плотность и объём.

Основные параметры существующих и перспективных конструкций лесных граблей целесообразно определять с учётом формируемого при по-

мощи лесных грабель вороха порубочных остатков, характеризующего, в частности, его объёмом.

На рис. 3 представлен формируемый при помощи лесных грабель ворох порубочных остатков объёмом  $V_R$ , при этом для наглядности изображения верхняя точка указанного объёма (рис. 3, т. А) не совпадает с верхней крайней точкой (рис. 3, т. В) рабочей поверхности лесных грабель.

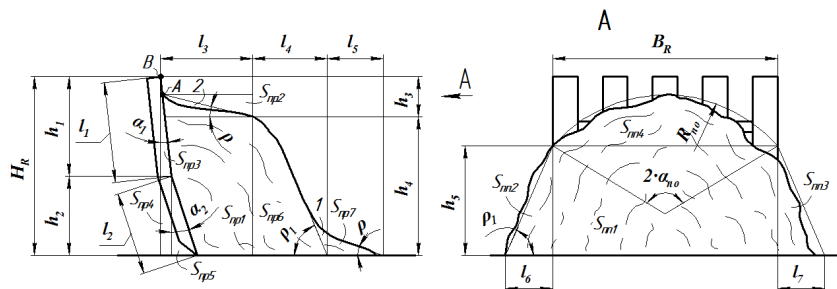


Рис. 3. Расчётная схема формируемого при помощи лесных грабель объёма порубочных остатков

Fig. 3. Calculation scheme of the volume of logging residues formed using a forest rake

Конструктивными параметрами, оказывающими непосредственное влияние на взаимодействие лесных грабель ломаного профиля с порубочными остатками, являются (рис. 3):  $B_R$  и  $H_R$  – соответственно, ширина и высота лесных грабель, м;  $l_1$  и  $l_2$  – длины верхней и нижней частей зуба лесных грабель, м;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы наклона верхней и нижней частей зуба лесных грабель, град.

Иными основными параметрами взаимодействия лесных грабель ломаного профиля с порубочными остатками являются (рис. 3):  $\rho$  – угол внутреннего трения свежесрезанной древесины (порубочных остатков) в покое, град.;  $\rho_1$  – критический угол обвала свежесрезанной древесины (порубочных остатков), град.;  $h_3$  – расстояние от верхней крайней точки рабочей поверхности лесных грабель до точки начала обвала свежесрезанной древесины (порубочных остатков), м;  $h_4$  – расстояние от точки взаимодействия лесных грабель с очищаемой поверхностью до точки начала обвала свежесрезанной древесины (порубочных остатков), м;  $h_5$  – расстояние от точки взаимодействия лесных грабель с очищаемой поверхностью до точки контакта по высоте крайнего по ширине зуба с порубочными остатками (высота валика порубочных остатков), м;  $l_6$  ( $l_7$ ) – ширина валика порубочных остатков, м.

Площади продольного ( $S_{пр}$ ) и поперечного ( $S_{пп}$ ) сечений формируемого объёма порубочных остатков (рис. 3) определяются как (1):

$$S_{пр} = \sum_{i=1}^{n_{пр}} S_{пр i}; \quad S_{пп} = \sum_{i=1}^{n_{пп}} S_{пп i}, \quad (1)$$

где  $S_{пр i}$  ( $S_{пп i}$ ) – элементарные площади продольного (поперечного) сечений объёма порубочных остатков при общем количестве таких площадей  $n_{пр}$  ( $n_{пп}$ ).

При определении площадей продольного ( $S_{пр}$ ) и поперечного ( $S_{пп}$ ) сечений формируемого объёма порубочных остатков принимались следующие допущения:

1. Очищаемая от порубочных остатков поверхность характеризуется наличием на ней лесной подстилки с отсутствием невыкорчеванных пней, а также иных естественных и искусственных включений (препятствий);
2. Угол наклона очищаемой от порубочных остатков поверхности не превышает  $3^\circ$ ;
3. В продольной проекции лесных грабель (рис. 3) формирующийся объём порубочных остатков достигает крайней точки (т. В) рабочей поверхности лесных грабель, в отдельных случаях превышая её по высоте;
4. При волочении объёма порубочных остатков угол  $\rho$  внутреннего трения одинаков (рис. 3) в начале и в конце данного объёма. Аналогично, критический угол обвала  $\rho_1$  одинаков как для основного объёма порубочных остатков (рис. 3), так и для валиков порубочных остатков, формирующихся по обе стороны ширины лесных грабель;
5. Размеры  $l_6$  и  $l_7$  валиков порубочных остатков одинаковы, при этом недостаток расчётного объёма одного валика компенсируется избытком расчётного объёма другого валика (рис. 3);
6. Продольный объём порубочных остатков, характеризуемый площадью  $S_{пп7}$  (рис. 3), распределяется по неучтённым объёмам (площадям) 1 и 2;
7. Верхняя граница объёма порубочных остатков с долей вероятности  $P = 0,9$  соответствует дуге радиуса  $R$  (рис. 3).
8. Динамически изменяющееся в процессе сгребания порубочных остатков расстояние  $h_3$  в каждый момент времени  $t$  соответствует наибольшему размеру (длине или размаху веток по их наиболее удалённым точкам от ствола/стволов) сгребаемых порубочных остатков.

С учётом принятых допущений, площади  $S_{\text{пр}1} \dots S_{\text{пр}6}$  ( $\text{м}^2$ ) определяются по формулам (2), просуммировав которые, можно определить площадь продольного сечения  $S_{\text{пр}}$  формируемого лесными граблями объёма порубочных остатков по формуле (3).

$$\begin{cases} S_{\text{пр}1} = \frac{H_R \cdot h_3}{\text{tg } \rho}, & S_{\text{пр}2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_3}{\text{tg } \rho} \cdot h_3, & S_{\text{пр}3} = \frac{1}{2} \cdot h_1 \cdot h_1 \cdot \text{tg } \alpha_1, \\ S_{\text{пр}4} = h_2 \cdot h_1 \cdot \text{tg } \alpha_1, & S_{\text{пр}5} = \frac{1}{2} \cdot h_2 \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2, & S_{\text{пр}6} = \frac{1}{2} \cdot h_4 \cdot \frac{h_4}{\text{tg } \rho_1}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{пр}} &= S_{\text{пр}1} - S_{\text{пр}2} - S_{\text{пр}3} - S_{\text{пр}4} - S_{\text{пр}5} + S_{\text{пр}6} = \\ &= \frac{H_R \cdot h_3}{\text{tg } \rho} - \frac{h_3^2}{2 \cdot \text{tg } \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 - \\ &\quad - \frac{l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - h_3)^2}{2 \cdot \text{tg } \rho_1} = \frac{H_R \cdot h_3}{\text{tg } \rho} - \frac{h_3^2}{2 \cdot \text{tg } \rho} - \\ &\quad - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - h_3)^2}{2 \cdot \text{tg } \rho_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Установленное выражение (3) представляет собой функцию площади продольного сечения порубочных остатков (перемещаемых по очищаемой поверхности и взаимодействующих с ней) в зависимости от конструктивных параметров лесных граблей (а именно –  $H_R$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и с учётом углов внутреннего трения  $\rho$  и обвала  $\rho_1$  свежесрезанной древесины (порубочных остатков).

С учётом принятых допущений площади  $S_{\text{пн}1} \dots S_{\text{пн}4}$  ( $\text{м}^2$ ) определяются по формуле (4), просуммировав которые, можно определить площадь поперечного сечения  $S_{\text{пн}}$  формируемого лесными граблями объёма порубочных остатков по формуле (5).

$$\begin{cases} S_{\text{пн}1} = B_R \cdot h_5; & S_{\text{пн}2} = S_{\text{пн}3} = \frac{1}{2} \cdot h_5 \cdot l_6; \\ S_{\text{пн}4} = \frac{R_{\text{но}}^2}{2} \cdot \left( \pi \cdot \frac{2 \cdot \alpha_{\text{но}}}{180} - \sin(2 \cdot \alpha_{\text{но}}) \right); \\ R_{\text{но}} = \frac{2 \cdot H_R / (1 - \cos \alpha_{\text{но}})}{2}; & \alpha_{\text{но}} = 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{пн}} = S_{\text{пн1}} + S_{\text{пн2}} + S_{\text{пн3}} + S_{\text{пн4}} = B_R \cdot h_5 + 2 \cdot \frac{h_5 \cdot l_6}{2} + \\
 + \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \frac{H_R - h_5}{1 - \cos \left( 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R} \right)} \right)^2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 2 \cdot 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R}}{180} - \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin \left( 2 \cdot 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - h_5)}{B_R} \right) \right) \right) = B_R \cdot l_6 \cdot \text{tg } \rho_1 + l_6^2 \cdot \text{tg } \rho_1 + \\
 + \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \frac{H_R - l_6 \cdot \text{tg } \rho_1}{1 - \cos \left( 2 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - l_6 \cdot \text{tg } \rho_1)}{B_R} \right)} \right)^2 \times \right. \\
 \left. \times \left( \frac{\pi \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - l_6 \cdot \text{tg } \rho_1)}{B_R}}{45} - \sin \left( 4 \cdot \arctg \frac{2 \cdot (H_R - l_6 \cdot \text{tg } \rho_1)}{B_R} \right) \right) \right). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Установленное выражение (5) представляет собой функцию площади поперечного сечения порубочных остатков (перемещаемых по очищаемой поверхности и взаимодействующих с ней) в зависимости от конструктивных параметров лесных граблей (а именно –  $H_R$ ,  $B_R$ ) и с учётом параметров формирования валиков порубочных остатков ( $\rho_1$  и  $l_6$ ).

С учётом формул (3) и (5), обозначая  $l_6 + l_7 = 2 \cdot l_b$ ,  $l_3 = l_{\text{пбо}}$ , а также принимая во внимание изменение (уменьшение) площади поперечного сечения  $S_{\text{пн}}$  в направлении движения базового транспортного средства, формируемый лесными граблями объём  $V_R$  ( $\text{м}^3$ ) порубочных остатков определится по формуле (6) как:

$$\begin{aligned}
 V_R = \left( \frac{H_R \cdot l_{\text{пбо}}}{\text{tg } \rho} - \frac{l_{\text{пбо}}^2}{2 \cdot \text{tg } \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \right. \\
 \left. - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - l_{\text{пбо}})^2}{2 \cdot \text{tg } \rho_1} \right) \cdot (B_R + 2 \cdot l_b). \quad (6)
 \end{aligned}$$

*Обсуждение.* Эффективность сгребания порубочных остатков лесными граблями во многом зависит от производительности работы рассматри-

ваемых технических средств. В целом производительность сгребания формирующейся биомассы вышеописанными (а также аналогичными по основным конструктивным элементам) лесными граблями зависит от следующих факторов:

- состояния удаляемой растительности (высокая плотность сгребаемой биомассы обуславливает повышенную вероятность застревания лесных граблей, необходимость применения увеличенных толкающих усилий трактора, повторных проходов для его продвижения);
- состояния остающейся растительности (большое расстояние между растущими деревьями/кустарниками, отсутствие подлеска и густой высокой травянистой растительности обуславливает возможность маневренной работы тракторного агрегата на повышенных скоростях);
- типа, состояния почвы и рельефа местности (работа на склонах или при неровном рельефе замедляет сгребание сформированной биомассы, высокая влажность почвы снижает проходимость и замедляет движение тракторного агрегата, обуславливает забивание зубьев лесных граблей смесью почвы и растительных остатков);
- загрязнённости очищаемой территории, наличия инфраструктурных препятствий (пни, валуны, камни, металлический лом, шины, а также столбы ЛЭП и т. п. обуславливают необходимость маневрирования тракторного агрегата на пониженных скоростях).

В целом, принимая во внимание вышеописанные результаты исследования, производительность  $W_R$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) работы трактора с агрегатированными на нём лесными граблями определится по формуле (7):

$$W_R = \frac{3600 \cdot V_R \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{3600 \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}} \cdot \left( \frac{H_R \cdot l_{\text{ПБО}}}{\text{tg} \rho} - \frac{l_{\text{ПБО}}^2}{2 \cdot \text{tg} \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - l_{\text{ПБО}})^2}{2 \cdot \text{tg} \rho_1} \right) \cdot (B_R + 2 \cdot l_{\text{в}}). \quad (7)$$

где  $V_R$  – формируемый лесными граблями объём порубочных остатков,  $\text{м}^3$ ;  $k_{\text{п}}$  – коэффициент окраинных потерь порубочных остатков лесными граблями ( $k_{\text{п}} = 0,9 \dots 1$ );  $k_{\text{в}}$  – коэффициент использования базового транспортно-го средства по времени ( $k_{\text{в}} = 0,8 \dots 0,9$ ).

Выполнение многофакторной оптимизации конструктивных параметров рассмотренных в данном исследовании технических средств сгребания



порубочных остатков позволит определить по полученному выражению (7) оптимальные величины производительности их работы, что, как следствие, позволит повысить эффективность сгребания лесными граблями формирующейся в ходе проведения лесозаготовок или проведения лесохозяйственных работ биомассы.

*Заключение.* Установлено, что, несмотря на важность выполнения технологической операции сбора и сгребания порубочных остатков, лесные грабли (призванные осуществлять указанную технологическую операцию) рассматриваются в современных отечественных и мировых научно-исследовательских работах весьма поверхностно, зачастую лишь в рамках обсуждения вопросов о необходимости сбора (фактически заготовки) формирующейся биомассы из порубочных остатков.

Показано, что формируемый лесными граблями ворох волочения порубочных остатков обладает такими отличительными характеристиками, как масса, плотность и объём, от величины последнего при этом зависит производительность работы трактора с агрегатированными на нём лесными граблями.

Выявлено, что объём вороха волочения лесными граблями определяется их конструктивными параметрами (габаритными шириной и высотой, длинами и углами наклона верхней и нижней частей зуба), параметрами сгребаемых порубочных остатков (наибольшим размером по длине или размаху веток, углом внутреннего трения, шириной валиков сгребаемой биомассы по сторонам лесных грабель).

Раскрыто, что производительность сгребания формирующейся биомассы лесными граблями зависит от комплекса влияющих факторов, связанных с состояниями удаляемой и остающейся растительности, типом почвы и рельефом местности, загрязнённостью очищаемой территории.

В перспективе предложено на основе многофакторной оптимизации конструктивных параметров лесных грабель выявить по полученному в исследовании выражению оптимальные величины производительности работы лесных грабель, что позволит повысить эффективность сгребания ими формирующихся порубочных остатков.

*Сведения о финансировании исследования.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

Маганов И.А., Тихонов Е.А., Петруша С.В., Трушевский П.В., Морковин В.А., Куницкая О.А. Исследование энергетического баланса лесных терминалов, функционирующих на биотопливных источниках энергии // Лесотехнический журнал. 2024. № 14(3). С. 5-22. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1.

Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. № 27(6). С. 139-150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150.

Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 2(392). С. 88-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-88-105.

Трушевский П.В., Должиков И.С., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Ревяко С.И., Баранов А.Н. Определение доступного запаса порубочных остатков на лесосеке после сплошной рубки по скандинавской технологии // Resources and Technology. 2024. № 21(3). С. 57-74. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7863.

Dickens D., Morris L., Clabo D., Ogden L. Pine Straw Raking and Growth of Southern Pine: Review and Recommendations // Forests. 2020. Vol. 11. Art. no. 799. DOI: 10.3390/f11080799.

Elliot W., Rhee H. Impacts of Forest Biomass Operations on Forest Hydrologic and Soil Erosion Processes // Trees, Forests and People. 2022. Vol. 7. Art. no. 100186. DOI: 100186. 10.1016/j.tfp.2021.100186.

Fernandez-Lacruz R., Edlund M., Bergström D., Lindroos O. Productivity and profitability of harvesting overgrown roadside verges – a Swedish case study // International Journal of Forest Engineering. 2020. Vol. 32. P. 1–10. DOI: 10.1080/14942119.2020.1822664.

Fokin S., Shportko O., Druchinin D. On shredding of wood raw materials with knives of different designs // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 145. Art. no. 03012. DOI: 10.1051/bioconf/202414503012.

Garren A., Bolding M., Barrett S., Aust W.M., Coates T.A. Characteristics of forest biomass harvesting operations and markets in Virginia // Biomass and Bioenergy. 2022. Vol. 163. Art. no. 106501. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106501.

Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhriev A., Spiridonova A., Perfiliev P., Teppoev A. Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2024. Vol. 11. P. 745-753. DOI: 10.18280/mmep.110319.

Kühmaier M., Grünberg J. The Relevance of Criteria and Indicators for Sustainable Timber Harvesting from the Perspective of Different Stakeholders. Journal of Sustainable // Forestry. 2025. Vol. 44. P. 1-21. DOI: 10.1080/10549811.2025.2513229.

Laitila J., Väättä K. Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, iss. 5. Art. no. 21. DOI: 10.14214/sf.10379.

Laitila J., Väättäinen K. Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges // *International Journal of Forest Engineering*. 2021. Vol. 32, iss. 2. P. 140-154. DOI: 10.1080/14942119.2021.1903790.

Louis L.T., Daigneault A., Kizha A.R. Constraints and opportunities in harvesting woody biomass: perspectives of foresters and loggers in the Northeastern United States // *International Journal of Forest Engineering*. 2024. Vol. 35. P. 1-16. DOI: 10.1080/14942119.2023.2299158.

Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A., Han H.-S., Weiskittel A. Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis // *Current Forestry Reports*. 2022. Vol. 8. P. 38-54. DOI: 10.1007/s40725-021-00156-5.

Mcgookin C., Charchi N., Mendonça A., Beretta S., Ellis N. Green waste, an untapped energy source? Reviewing the prospect of green waste as a biomass energy source // *Cleaner Waste Systems*. 2025. Vol. 11. Art. no. 100273. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100273.

Morais G.F. de, Santos J.d.S.G., Han D., Filho L.O.R., Xavier M.G.B., Schimdt L., de Souza H.D., de Castro F.T., de Souza-Esquerdo V.F., Albiero D. Agricultural Machinery Adequacy for Handling the Mombaça Grass Biomass in Agroforestry Systems // *Agriculture*. 2023, Vol. 13. Art. no. 1416. DOI: 10.3390/agriculture13071416.

Nilsson D., Grönlund Ö. Productivity and cost of harvesting roadside brushwood and small trees in Sweden: a simulation study // *International Journal of Forest Engineering*. 2024. Vol. 35, iss. 1. P. 1-14. DOI: 10.1080/14942119.2024.2336686.

Yoshimura T., Suzuki Y., Sato N. Application of System Dynamics Simulation to Assess System Productivity of Forest Harvesting Systems: A Case Study from Japan // *Forests*. 2025. Vol. 16, iss. 5. Art. no. 734. DOI: 10.3390/f16050734.

## References

Dickens D., Morris L., Clabo D., Ogden L. Pine Straw Raking and Growth of Southern Pine: Review and Recommendations. *Forests*, 2020, vol. 11, art. no. 799. DOI: 10.3390/f11080799.

Elliot W., Rhee H. Impacts of Forest Biomass Operations on Forest Hydrologic and Soil Erosion Processes. *Trees, Forests and People*, 2022, vol. 7, art. no. 100186. DOI: 100186. 10.1016/j.tfp.2021.100186.

Fernandez-Lacruz R., Edlund M., Bergström D., Lindroos O. Productivity and profitability of harvesting overgrown roadside verges – a Swedish case study. *International Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 32, pp. 1-10. DOI: 10.1080/14942119.2020.1822664.

Fokin S., Shportko O., Druchinin D. On shredding of wood raw materials with knives of different designs. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 145, art. no. 03012. DOI: 10.1051/bioconf/202414503012.

Garren A., Bolding M., Barrett S., Aust W.M., Coates T.A. Characteristics of forest biomass harvesting operations and markets in Virginia. *Biomass and Bioenergy*, 2022, vol. 163, art. no. 106501. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106501.

Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhriev A., Spiridonova A., Perfiliev P., Teppoev A. Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2024, vol. 11, pp. 745-753. DOI: 10.18280/mmep.1110319.

Kühmaier M., Grinberg J. The Relevance of Criteria and Indicators for Sustainable Timber Harvesting from the Perspective of Different Stakeholders. *Journal of Sustainable Forestry*, 2025, vol. 44, pp. 1-21. DOI: 10.1080/10549811.2025.2513229.

Laitila J., Väättäinen K. Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, iss. 5, art. no. 21. DOI: 10.14214/sf.10379.

Laitila J., Väättäinen K. Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 32, iss. 2, pp. 140–154. DOI: 10.1080/14942119.2021.1903790.

Louis L.T., Daigneault A., Kizha A.R. Constraints and opportunities in harvesting woody biomass: perspectives of foresters and loggers in the Northeastern United States. *International Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 35, pp. 1–16. DOI: 10.1080/14942119.2023.2299158.

Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A., Han H.-S., Weiskittel A. Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 38–54. DOI: 10.1007/s40725-021-00156-5.

Maganov I.A., Tikhonov E.A., Petrusha S.V., Trushevsky P.V., Morkovin V.A., Kunickaya O.A. Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Forestry Engineering Journal*, 2024, vol. 14, iss. 3, pp. 5-22. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1. (In Russ.)

Mcgookin C., Charchi N., Mendonça A., Beretta S., Ellis N. Green waste, an untapped energy source? Reviewing the prospect of green waste as a biomass energy source. *Cleaner Waste Systems*, 2025, vol. 11, art. no. 100273. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100273.

Morais G.F. de, Santos J.d.S.G., Han D., Filho L.O.R., Xavier M.G.B., Schmidt L., de Souza H.D., de Castro F.T., de Souza-Esquerdo V.F., Albiero D. Agricultural Machinery Adequacy for Handling the Mombaça Grass Biomass in Agroforestry Systems. *Agriculture*, 2023, vol. 13, art. no. 1416. DOI: 10.3390/agriculture13071416.

Nilsson D., Grönlund Ö. Productivity and cost of harvesting roadside brushwood and small trees in Sweden: a simulation study. *International Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 35, iss. 1, pp. 1-14. DOI: 10.1080/14942119.2024.2336686.

Platonov A.A. Forest rakes: purpose, scope, classification. *Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, iss. 6, pp. 139-150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150. (In Russ.)

Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Justification of technological processes and machine systems for logging operations. *IVUZ. Forestry journal*, 2023, vol. 2 (392), pp. 88-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-88-105. (In Russ.)

Trushevsky P.V., Dolzhikov I.S., Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Revyako S.I., Baranov A.N. Determination of the available stock of logging residues in the felling area after clear-cutting using Scandinavian technology. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, iss. 3, pp. 57-74. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7863. (In Russ.)

Yoshimura T., Suzuki Y., Sato N. Application of System Dynamics Simulation to Assess System Productivity of Forest Harvesting Systems: A Case Study from Japan. *Forests*, 2025, vol. 16, iss. 5, art. no. 734. DOI: 10.3390/f16050734.

*Материал поступил в редакцию 17.02.2025*

---

**Гнусов М.А., Платонов А.А., Дручинин Д.Ю.** Моделирование объёма вороха волочения порубочных остатков, формируемого лесными граблями // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 277–291. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.277-291

Технологическая операция сбора или сгребания порубочных остатков, входящая в состав целого ряда технологических процессов выполнения работ по заготовке древесины или целенаправленного удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности, должна выполняться специализированными техническими средствами под общим названием «лесные грабли». Актуальность исследования определяется отсутствием современных научных работ, оценивающих такой ключевой момент достижения оптимальной производительности лесных граблей, как выявление объёма формируемого ими вороха порубочных остатков. Целью исследования является разработка математической модели формирования объёма вороха порубочных остатков с целью повышения эффективности их сгребания лесными граблями. Объект исследования представлял собой лесные грабли с ломаным профилем зубьев постоянного сечения поверхности и наличием предохранительных устройств, закрепляющиеся на переднюю (преимущественно) или заднюю навеску трактора типа Belarus-82.1. Выявлено, что конструктивные параметры лесных граблей ломаного профиля зубьев (а именно: ширина и высота граблей, длины и углы наклона верхней и нижней частей зуба), параметры сгребаемых лесными граблями порубочных остатков (наибольший размер по длине или размаху веток, угол внутреннего трения, размеры валиков сгребаемой биомассы по обеим сторонам лесных граблей) оказывают непосредственное влияние на взаимодействие лесных граблей с порубочными остатками, формируя объём вороха волочения. Показано, что эффективность сгребания порубочных остатков лесными граблями во многом зависит от производительности их работы, зависящей при этом от комплекса влияющих факторов, связанных с состояниями

удаляемой (сгребаемой) и остающейся (на очищаемой территории) растительности, типом почвы и рельефом местности, степенью загрязнения указанной территории. По результатам данной работы авторами предложено на основе многофакторной оптимизации конструктивных параметров принятых в исследование лесных граблей выявить оптимальные величины производительности их работы, что позволит повысить эффективность сгребания лесными граблями формирующихся порубочных остатков.

**Ключевые слова:** порубочные остатки, сгребание, лесные грабли, моделирование, конструктивные параметры, ворох волочения, производительность.

**Gnusev M.A., Platonov A.A., Druchinin D.Yu.** Modeling the volume of a heap of logging residue drag formed by a forest rake. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 277–291 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.277-291

To collect or rake logging residues during timber harvesting or targeted removal of unwanted trees and shrubs, the technological process provides for a corresponding technological operation, which must be performed by specialized technical means under their common name «forest rakes». The relevance of the study is determined by the lack of modern scientific works evaluating such a key moment of achieving optimal productivity of forest rakes as identifying the volume of the logging residue pile formed by them. The purpose of the study is to develop a mathematical model for the formation of the volume of the logging residue pile in order to increase the efficiency of their raking by forest rakes. The object of the study was a forest rake with a broken profile of teeth of constant surface cross-section and the presence of safety devices, fixed to the front (mainly) or rear hitch of a Belarus-82.1 tractor. It has been revealed that the design parameters of forest rakes with a broken tooth profile (namely: the width and height of the rake, the lengths and angles of inclination of the upper and lower parts of the tooth), the parameters of logging residues raked by forest rakes (the largest size along the length or span of branches, the angle of internal friction, the sizes of the rollers of raked biomass on both sides of the forest rake) have a direct effect on the interaction of the forest rake with logging residues, forming the volume of the drag heap. It has been shown that the efficiency of raking logging residues by forest rakes largely depends on the productivity of their work, which depends on a set of influencing factors associated with the state of the removed (raked) and remaining (on the cleared territory) vegetation, the type of soil and terrain, the degree of pollution of the said territory. In order to increase the efficiency of raking forest rakes of logging residues, the authors of the study, based on the results of this work, proposed to identify the optimal values of their performance based on multifactor optimization of the design parameters of the forest rakes adopted in the study.

**Keywords:** logging residues, raking, forest rakes, modeling, design parameters, drag pile, productivity.

**ГНУСОВ Максим Александрович** – руководитель лаборатории лесного машиностроения Инжинирингового центра Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, доктор технических наук, доцент. SPIN-код: 6242-1723. ORCID: 0000-0003-1653-4595.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: mgnusov@yandex.ru

**GNUSOV Maksim A.** – DSc (Technical), Head of the Laboratory of Forestry Engineering of the Engineering Center of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 6242-1723. ORCID: 0000-0003-1653-4595.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: mgnusov@yandex.ru

**ПЛАТОНОВ Алексей Александрович** – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 1306-3080. ORCID: 0000-0003-4114-4636.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: paa7@rambler.ru

**PLATONOV Aleksey A.** – PhD (Technical), Associate Professor of Department of Forestry Mechanization and Machinery Design of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 1306-3080. ORCID: 0000-0003-4114-4636.

394087, Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: paa7@rambler.ru

**ДРУЧИНИН Денис Юрьевич** – заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 2482-8478. ORCID: 0000-0003-2128-2687.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

**DRUCHININ Denis Yu.** – PhD (Technical), Head of Department of Forestry Mechanization and Machinery Design of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 2482-8478. ORCID: 0000-0003-2128-2687.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru